

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СЕНСОРИКИ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка»,
освітньої програми «Мікро- та наноелектроніка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Фізичні основи сенсорики: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», освітньої програми «Мікро- та наноелектроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. М. Коваль. – Електронні текстові данні (1 файл: 1,47 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 65 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10 від 18.06.2020 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол №05/2020 від 25.05.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СЕНСОРИКИ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладачі: *Коваль Вікторія Михайлівна*, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний
редактор *Орлов А. Т.*, проф., к.т.н., доц.

Рецензенти: *Попов А. О.*, доц., к.т.н., доц.

Метою лабораторного практикуму є ознайомлення студентів на практиці з фізичними ефектами, що лежать в основі роботи сенсорів і засвоєння методики вимірювання їх основних характеристик. Студентам пропонується виконати 6 лабораторних робіт по резистивним сенсорам температури, діелектричним сенсорам вологи, ІЧ-сенсорам газу (рідини), електрохімічним сенсорам рідин, напівпровідниковим сенсорам освітленості, конверсійним сенсорам УФ випромінювання. До кожної лабораторної роботи в посібнику містяться короткі теоретичні відомості, опис лабораторного стенду, порядок виконання роботи, рекомендації щодо обробки результатів вимірювання та контрольні запитання.

© В.М. Коваль, 2020

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

ЗМІСТ

Загальні вказівки щодо виконання, оформлення та захисту лабораторних робіт.....	4
Лабораторна робота №1 "Резистивні сенсори температури".....	7
Лабораторна робота №2 "Діелектричні сенсори вологи".....	19
Лабораторна робота №3 "Оптичні сенсори газу (рідини)".....	26
Лабораторна робота №4 "Електрохімічні сенсори фізіологічних рідин".....	33
Лабораторна робота №5 "Напівпровідникові сенсори освітленості".....	42
Лабораторна робота №6 "Сенсори ультрафіолетового випромінювання ".....	53
Перелік рекомендованої літератури.....	64

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ЩОДО ВИКОНАННЯ, ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Сенсори оточують нас повсюди – в побуті, транспорті, медицині, промисловості. Актуальність застосування сенсорів обумовлена потребою відслідковувати в реальному часі стан оточуючого середовища, промислового процесу, людського організму тощо. Якщо порівняти біологічну та технічну систему, то сенсори відіграють ту ж роль в технічній системі, що й органи відчуття людини. Сьогодні сенсори виготовляють як у вигляді окремо взятих портативних приладів (сенсори температури, вологи, тиску, концентрації, газові сенсори, рН-метри тощо), так і у складі завершених приладів та пристроїв (побутові прилади, транспортні засоби, промислове обладнання, засоби зв'язку тощо). Тому набуття теоретичних знань та практичних навичок роботи в галузі сенсорики є необхідним для випускника будь-якої технічної спеціальності.

Метою лабораторних робіт з курсу "Фізичні основи сенсорики" є ознайомлення на практиці з принципом дії ряду сенсорів, засвоєння методики вимірювання та розрахунку їх основних характеристик. Студентам пропонується виконати 6 лабораторних робіт, які присвячені терморезистивним сенсорам температури, діелектричним сенсорам вологи, ІЧ-сенсорам газу (рідини), електрохімічним сенсорам рідин, напівпровідниковим сенсорам освітленості, конверсійним сенсорам УФ випромінювання. В навчальному посібнику до кожної роботи наведено короткі теоретичні відомості, опис лабораторного стенду, порядок виконання роботи, обробка результатів вимірювання та контрольні запитання.

Перед початком виконання лабораторної роботи студент зобов'язаний уважно ознайомитись з методичними вказівками щодо виконання даної роботи. Допуск до виконання лабораторної роботи студент одержує усно, відповівши

викладачу на питання про тему роботи, структуру лабораторного стенду та порядок проведення вимірювань. Лише після допуску студенти починають виконувати лабораторну роботу. Під час виконання експериментальної частини роботи потрібно дотримуватись наступних правил:

- забороняється торкатися відкритих струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, а також нагрітих частин вимірювального обладнання;
- зміни в схемі лабораторного стенду слід робити тільки після його відключення від джерела живлення;
- при виникненні несправності в приладах і устаткуванні негайно відключити джерело живлення і повідомити викладача;
- після закінчення роботи необхідно вимкнути вимірювальні прилади.

Під час лабораторної роботи студенти заносять отримані числові дані у таблиці. Наприкінці заняття результати лабораторної роботи потрібно надати викладачу на перевірку. Після затвердження викладачем лабораторна робота вважається виконаною. Якщо робота не була виконана в повному обсязі, то її завершення переноситься на наступне заняття.

На заліковому лабораторному занятті студент надає викладачу оформлений звіт про виконання лабораторної роботи. Звіт повинен містити: титульний аркуш, мету роботи, короткі теоретичні відомості, блок-схему та опис вимірювального стенду, порядок виконання та результати лабораторної роботи (таблиці з результатами вимірювання, графічні залежності, розраховані коефіцієнти), а також висновки по роботі.

Підготовка до захисту лабораторної роботи включає в себе підготовку звіту (1 протокол на підгрупу) та ознайомлення з теоретичними відомостями, які викладені в методичних вказівках, лекційному матеріалі та в списку рекомендованої літератури.

Захист лабораторної роботи здійснюється окремо кожним студентом в письмовій (або усній) формі. Запитання на захисті формуються із розділу навчального посібника Контрольні запитання, що містяться після кожної роботи.

Оцінювання роботи студентів на лабораторних заняттях здійснюється на основі Положення про рейтингову систему оцінювання з курсу "Фізичні основи сенсорики".

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Резистивні сенсори температури

Мета роботи – визначити залежність опору резистивного сенсора температури від відстані до джерела тепла.

Короткі теоретичні відомості

Сенсори температури є одними з найпоширеніших класів сенсорів у промисловості (приблизно 50% від загальної кількості первинних перетворювачів), що обумовлює існування великої кількості їх різновидів: металеві терморезистори, термістори, позистори, болометри, термопарні сенсори, термодіоди, термотранзистори, піроелектричні сенсори, теплові та фотонні сенсори.

Терморезистори – це резистивні елементи, виготовлені з провідникового або напівпровідникового матеріалу, в яких використовується залежність електричного опору матеріалу від температури. Відповідно до виду застосовуваного матеріалу розрізняють металеві та напівпровідникові терморезистори (термістори, позистори).

Температурна залежність питомого опору металу визначається, головним чином, довжиною вільного пробігу електронів:

$$\rho = \frac{h}{K \cdot q^2 \cdot n^{2/3} \cdot l_{cp}} \quad (1)$$

де l_{cp} – середня довжина вільного пробігу електрону, n – концентрація електронів, q – елементарний заряд, h – постійна Планка, K – стала.

Зі зростанням температури збільшується амплітуда коливання вузлів кристалічної ґратки, що призводить до зменшення довжини вільного пробігу електронів та зростання опору провідника. Тому для металів температурний коефіцієнт опору (ТКО) завжди приймає додатне значення. Для виготовлення металевих терморезисторів використовують платину, мідь, нікель, вольфрам, пермалой тощо.

Температурна залежність електропровідності напівпровідників має складніший характер і визначається температурними залежностями концентрації та рухливості носіїв заряду:

$$\sigma = q \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \quad (2)$$

$$n = n_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E_d}{2 \cdot k \cdot T}} \quad (3)$$

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E_a}{2 \cdot k \cdot T}} \quad (4)$$

де σ – питома електропровідність, q – елементарний заряд, n, p – концентрація електронів та дірок, μ_n, μ_p – рухливість електронів та дірок, $\Delta E_d, \Delta E_a$ – глибина залягання донорних та акцепторних домішок, k – стала Больцмана, T – температура.

В області низьких температур зі збільшенням температури зростає концентрація вільних носіїв заряду за рахунок іонізації домішок. При подальшому збільшенні температури концентрація вільних носіїв заряду практично не змінюється, оскільки всі домішки вже іонізовані, а ймовірність іонізації власних атомів ще дуже низька. Ця ділянка називається ділянкою виснаження домішок. При подальшому зростанні температури концентрація вільних носіїв заряду зростає за рахунок іонізації власних атомів.

Рухливість носіїв заряду обумовлюється процесами розсіяння носіїв заряду у напівпровідниках. При цьому розглядають 2 механізми розсіяння: розсіяння на теплових коливаннях ґратки та на іонізованих домішках:

$$\mu \approx T^{-\frac{3}{2}} \quad (5)$$

$$\mu \approx T^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

При зростанні температури амплітуда теплових коливань атомів ґратки зростає, при цьому зростає розсіяння носіїв заряду на них, тому рухливість носіїв заряду падає. Даний механізм розсіяння переважає за високих температур, а за низьких має нехтовно малий вплив.

За низьких температур домінуючий вплив здійснює розсіяння на іонізованих домішках, оскільки навіть за низьких температур більша частина домішкових атомів знаходиться в іонізованому стані. Кожний іон створює навколо себе електричне поле, яке притягує або відштовхує носії заряду, тобто відхиляє траєкторію їх руху. Чим вища температура, тим більша швидкість носія заряду, а, отже меншим є час його перебування під впливом відхиляючого поля іонізованих домішків, а тому рухливість носіїв заряду зростає.

Однак рухливість носіїв заряду визначається також і концентрацією домішків: чим вища концентрація домішків, тим рухливість носіїв заряду менша. Слід зауважити, що в області високих температур вплив концентрації є незначним.

Оскільки температурна залежність рухливості описується більш слабкою степеневою функцією, а температурна залежність концентрації – експоненціальною функцією, то в загальному підсумку температурна залежність питомої електропровідності описується температурною залежністю концентрації, а залежність рухливості від температури вносить свій вклад лише в області виснаження домішків.

Напівпровідникові терморезистори в залежності від того зростає чи зменшується їх опір при нагріванні поділяються відповідно на позистори та термістори.

Термістор – це напівпровідниковий терморезистор з від’ємним ТКО. Фізичні явища, які лежать в основі роботи термісторів: збільшення концентрації носіїв зарядів, збільшення інтенсивності обміну електронами між іонами зі змінною валентністю, фазові перетворення напівпровідникового матеріалу.

Перше явище лежить в основі роботи термісторів, виготовлених з монокристалів ковалентних напівпровідників (кремнію, германію, карбїду кремнію, з’єднань A^3B^5). Такі терморезистори працюють в області температур, що відповідає домішковій або власній електропровідності напівпровідника.

Найбільш поширені термістори виготовляються з порошків оксидів Mn, Fe, Ni, Cu, Zn та Co. Електропровідність таких матеріалів пов’язана з обміном електронів між сусідніми іонами.

В оксидах ванадію за температур фазового переходу (68 та – 110 °C) спостерігається зменшення питомого опору на декілька порядків, що також використовується в термісторах.

Позистор – це напівпровідниковий терморезистор з додатнім ТКО. Позистори виготовляють на основі кераміки з титанату барію з домішками La, Ce, Ta, Nb, Sb. Крім титаната барія, використовують також кремнієві позистори, які працюють в області виснаження домішків.

Напівпровідникові терморезистивні перетворювачі мають такі переваги порівняно з металевими терморезисторами: малі габарити, мала інерційність та висока чутливість. Однак напівпровідникові перетворювачі поступаються металевим в точності.

Термопарні сенсори температури працюють на основі ефекту Зеєбека, який полягає у виникненні термоЕРС в колі з двох різнорідних провідників чи напівпровідників, які називаються термоелектродами, якщо температура місця

з'єднання електродів (так званий робочий або гарячий спай) та температура вільних (або холодних) кінців є різною. Як правило, термопара складається з двох послідовно з'єднаних пайкою або зварюванням металевих різнорідних провідників. У поєднанні з електровимірювальними приладами термопара утворює термоелектричний термометр, шкала якого градується безпосередньо в К або °С. Принцип дії таких термометрів оснований на вимірюванні термоЕРС термопар, один кінець якої термостатований (як правило, при 0°C), та співставленні цієї величини з табличними даними для даної пари термоелектродів з метою визначення досліджуваної температури. Для виготовлення металевих термопарних сенсорів використовують наступні матеріали: хромель – алюмель, мідь – константан, залізо – константан тощо. Напівпровідникові термопарні сенсори температури також набувають значного поширення. Так, широко використовується термопара кремній – алюміній. Переваги кремнієвих термопар – це застосування традиційної інтегральної технології для виготовлення такого сенсору.

ІЧ-фотоприймачі можна поділити на два класи: теплові та фотонні. В теплових приймачах ІЧ випромінювання, яке поглинається, викликає нагрівання чутливого елемента, що в свою чергу викликає зміну певних характеристик детектора. В фотонних приймачах поглинуте ІЧ випромінювання призводить до переходів між енергетичними станами кристалу. Теплові приймачі характеризуються рівномірною чутливістю у досить широкому діапазоні ІЧ-спектру, однак мають невелику чутливість та швидкодію. Для фотонних приймачів характерним є селективність по спектру, однак високий рівень чутливості в цьому діапазоні та швидкодія.

Принцип дії ІЧ-фотоприймачів базується на основі основних законів поглинання та випромінювання твердих тіл, сформульованих для так званого абсолютно чорного тіла. Абсолютно чорне тіло (АЧТ) – це тіло, що поглинає все

падаюче на нього електромагнітне випромінювання. Перший закон випромінювання Віна:

$$u_\nu = \nu^3 \cdot f\left(\frac{\nu}{T}\right) \quad (7)$$

де u_ν – густина енергії випромінювання, ν – частота випромінювання, T – температура тіла, що випромінює, f – функція, що залежить лише від частоти та температури.

Перший закон Віна є загальною формулою, з якої може бути виведений будь-який інший закон випромінювання, наприклад, закон Стефана-Больцмана, другий закон Віна, закон Планка, закон Релея-Джинса і т.д.

Другий закон Віна – частковий випадок першого закону Віна, справедливий лише в області високих частот:

$$u_\nu = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot e^{-\frac{h\nu}{kT}} \quad (8)$$

де h – стала Планка, c – швидкість світла.

Закон Релея-Джинса справедливий в області низьких частот:

$$E(\nu, T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T \cdot \nu^2}{c^2} \quad (9)$$

Цей закон передбачає квадратичну залежність спектральної густини випромінювання від частоти. При прямуванні частоти до нуля даний закон переходить в закон Планка:

$$I = \frac{2 \cdot h \cdot \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (10)$$

де $E(\nu, T)$ – спектральна густина випромінювання, I – інтенсивність випромінювання АЧТ.

Закон Планка визначає спектр випромінювання АЧТ. А закон Релея-Джинса та другий закон Віна є його крайніми випадками, які історично стали відомими раніше.

Загальна енергія теплового випромінювання визначається законом Стефана-Больцмана:

$$j = \sigma \cdot T^4 \quad (11)$$

де j – потужність на одиницю поверхні, що випромінює, σ - постійна Стефана-Больцмана.

Даний закон випливає із закону Планка шляхом інтегрування і говорить про те, що потужність випромінювання АЧТ, що припадає на одиницю площі поверхні, прямо пропорційна четвертій степені температури тіла. Для нечорних тіл приблизно можна записати, що:

$$j = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (12)$$

де ε – степінь чорноти, для всіх тіл $\varepsilon < 1$, для АЧТ $\varepsilon = 1$.

Із закону Планка шляхом диференціювання випливає закон зміщення Віна, який полягає в тому, що довжина хвилі, за якої енергія випромінювання АЧТ є максимальною, визначається формулою:

$$\lambda_{\max} = \frac{0,0028999}{T} \quad (13)$$

За цією формулою визначають співвідношення між температурою АЧТ та кольором його випромінювання. Оптична пірометрія – це метод вимірювання температури, який базується на співвідношенні між температурою тіла та оптичним випромінюванням, яке це тіло випромінює. Звідси пірометр – це прилад

для безконтактного вимірювання температури тіла, принцип дії якого ґрунтується на вимірюванні потужності теплового випромінювання досліджуваного об'єкту. Болومتر – це терморезистор з зачорненою поверхнею, яка здатна ефективно поглинати ІЧ-випромінювання. Безконтактний метод вимірювання є необхідним для:

- високих вимірюваних температур (більше 2000°C),
- дуже агресивного оточуючого середовища (хімічна промисловість),
- матеріалів, що погано проводять тепло (скло, дерево, пластмаси),
- частин, що знаходяться під високою напругою,
- рухомих тіл (наприклад, листовий матеріал в прокатному виробництві металу).

Піроелектричний сенсор температури працює на основі піроелектричного ефекту, який полягає у зміні поляризованості діелектрика при зміні температури. В найпростішому вигляді даний клас сенсорів являє собою конденсатор – діелектрична пластина виготовлена з піроелектрику і розміщена між металевими обгортками. На одну з металевих обгортки наноситься зачорнений шар. В результаті поглинання теплової енергії температура пластини конденсатора збільшується і між обгортками з'являється напруга, що реєструється.

Матеріали піроелектричних датчиків: тригліцинсульфат, титанат барія, титанат свинця тощо. Основна відмінність піроелектричних сенсорів температури від термодатчиків полягає в тому, що в піродатчиках некомпенсований електричний заряд виникає лише в моменти швидкої появи/зникнення випромінювання. При тривалому опроміненні піродатчиків, електричний сигнал на виході сенсора буде рівний нулю. До переваг піроелектричних сенсорів температури відносять їх високу швидкодію та відсутність нагріву активного елементу сенсору.

Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд для дослідження резистивних сенсорів температури складається з блока живлення, джерела та приймача ІЧ випромінювання, системи руху джерела ІЧ випромінювання, теплового екрану та вимірювального приладу. Схема лабораторного стенду наведена на рис.1.

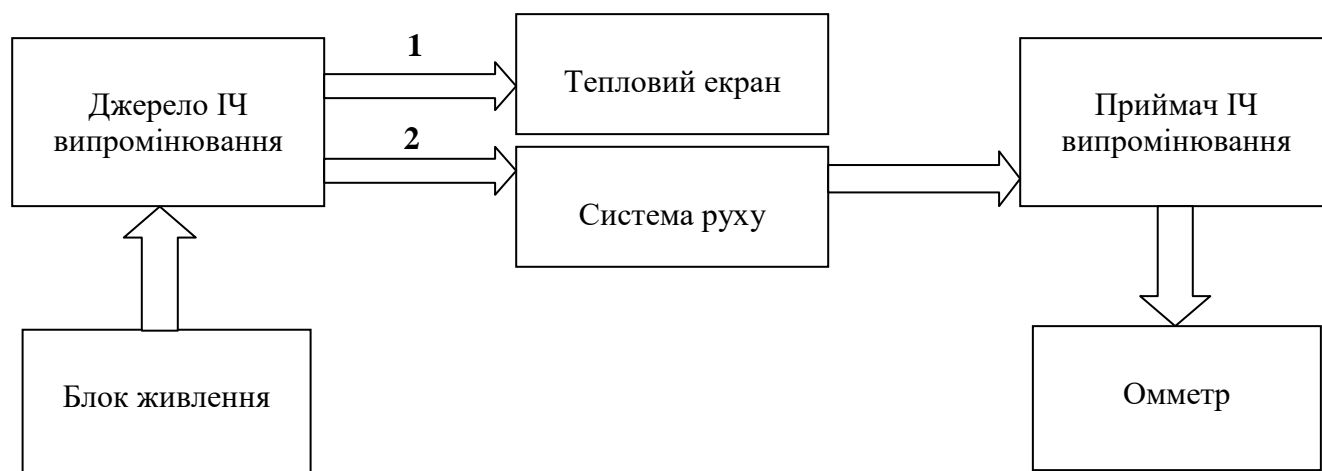


Рисунок 1 – Блок-схема лабораторного стенду:

1 – режим виходу стенду на задану температуру, 2 – режим проведення вимірювань

Напруга з блоку живлення подається на джерело ІЧ-випромінювання, в якому має місце перетворення електричного сигналу в теплоту. Приймач ІЧ-випромінювання змінює власний опір під дією теплового випромінювання, що реєструє вимірювальний прилад. Тепловий екран використовується перед проведенням вимірювань для забезпечення виходу лабораторного стенду на задану температуру. В якості блоку живлення використовується ЛІПС-35, який дає змогу керувати напругою живлення джерела ІЧ-випромінювання в діапазоні 0...35 В. Для створення теплового випромінювання використовується лампа

розжарювання, яка відноситься до стандартного джерела ІЧ випромінювання типу А. Джерело ІЧ-випромінювання закріплено на штативі з лінійкою таким чином, що воно може переміщатись по відношенню до приймача випромінювання на відстань 1...20 см. В якості приймача ІЧ випромінювання використовується болометр, який закріплений на протилежному кінці штатива. Зміна опору болометра під дією теплового випромінювання реєструється ампервольтметром Р386, який дає змогу вимірювати опір постійному струму в діапазоні 0,1 кОм...10 МОм.

Порядок виконання роботи

1. Встановити тепловий екран на штатив між джерелом та приймачем ІЧ випромінювання.
2. Ввімкнути блок живлення ЛІПС-35, виставити на ньому вихідну напругу 25 В та вихідний струм 1...2 А.
3. Ввімкнути ампервольтметр Р386 та виставити на ньому початковий вимірювальний діапазон опорів до 1МОм.
4. Коли лампа розжарювання досягне стаціонарного режиму (ІЧ випромінювання постійної густини), зняти тепловий екран та розпочати вимірювання.
5. За допомогою ампервольтметра Р386 виміряти початковий опір болометра (рівноважне значення), який знаходиться на відстані 20 см від лампи розжарювання.
6. Перемістити джерело ІЧ випромінювання вздовж штативу на 1 см в напрямку приймача ІЧ випромінювання.
7. За допомогою ампервольтметра Р386 виміряти опір болометра (рівноважне значення), який знаходиться на відстані 19 см від лампи розжарювання.

8. Повторювати два попередні пункти до тих пір, поки відстань між лампою розжарювання та болометром досягне 1 см.
9. Під час проведення вимірювань врахувати, що теплові приймачі є досить чутливими до конвекційних потоків та характеризуються тепловою інерцією, тому потребують захисту від протягів і встановленню рівноважних значень опору при кожному дослідженні.
10. Вимкнути блок живлення ЛІПС-35 та ампервольтметр Р386.

Обробка результатів вимірювання

1. Побудувати графічну залежність опору резистивного сенсора температури від відстані до джерела теплового випромінювання.
2. Апроксимувати побудовану графічну залежність однією з відомих математичних функцій.
3. На основі побудованого графіку встановити знак ТКО болометра. При цьому слід врахувати закон обернених квадратів для теплового випромінювання.
4. Зробити висновок про тип терморезистора та характер залежності опору болометра від відстані до джерела ІЧ випромінювання.

Контрольні запитання

1. В чому полягає принцип дії металевого терморезистора?
2. Що собою являє температурна залежність концентрації носіїв заряду в напівпровідниках?
3. Якою є температурна залежність рухливості носіїв заряду в напівпровідниках?
4. Поясніть принцип дії позистора та термістора на основі температурної залежності електропровідності в напівпровідниках.

5. Порівняйте напівпровідникові та металеві терморезистори.
6. Що таке ефект Зеебека та його застосування в термометрії?
7. Перелічіть сенсори, які використовуються для контактного та безконтактного вимірювання температури.
8. Що собою являє болометр?
9. Які особливості теплових та фотонних ІЧ-приймачів?
10. Які закони поглинання та випромінювання, сформульовані для АЧТ, Ви знаєте?
11. Поясніть фізичну суть роботи піроелектричних сенсорів температури.
12. Наведіть особливості піроелектричних сенсорів температури.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Діелектричні сенсори вологи

Мета роботи – дослідити кінетику поглинання вологи діелектричних матеріалів за допомогою діелектричного сенсора вологи.

Короткі теоретичні відомості

Сенсор вологи (або гігрометр) призначений для визначення кількості водяної пари в даному газі. Вологість газу вимірюється в абсолютних та відносних одиницях. Абсолютна вологість – це маса водяної пари, яка міститься в одиниці об'єму вологого газу (г/м^3). Відносна вологість – це відношення кількості водяної пари, що міститься в одному кубічному метрі газової суміші, до максимально можливої кількості пари, що може міститись у цьому ж об'ємі при тій же температурі (%).

Розрізняють два методи вимірювання вологості – резистивний та ємнісний. Резистивний метод ґрунтується на залежності електричних властивостей матеріалу від вмісту водяної пари. Конструктивно такий сенсор складається з вологочутливої плівки (наприклад, CoO , Fe_2O_3 , кремнійорганічних полімерів), нанесеної на підкладку, а також двох корозійно стійких електродів. При поглинанні вологи електропровідність вологочутливої плівки змінюється, що реєструється і ставиться у відповідність кількості поглинутої вологи. Ємнісний метод ґрунтується на залежності діелектричних властивостей матеріалу від вмісту водяної пари. Оскільки для сухих речовин діелектрична проникність рівна 2 – 5, а для води 81, то невелика зміна вологості матеріалу призводить до значної зміни його діелектричної проникності. Конструктивно такий сенсор складається з

вологочутливої плівки (наприклад, полімеру), нанесеної на нижній електрод (наприклад, тантал) та верхнього пористого електроду (наприклад, хром, золото). Поглинання вологи призводить до зміни ємності конденсатора, між обгортками якого розміщено вологочутливу плівку, що реєструється і ставиться у відповідність кількості поглинутої вологи.

В якості чутливого елементу досить перспективним зараз являється поруватий кремній, який отримують шляхом хімічного або анодного травлення у розчинах на основі плавикової кислоти. Розмір пор становить 2 – 15 нм, пористість становить 20 – 80 %. За рахунок особливостей своєї структури поруватий кремній має велику внутрішню площу, тому він придатний для використання в сенсорах вологи.

Всі матеріали за здатністю поглинати вологу поділяють на гідрофільні та гідрофобні. Гідрофільні матеріали складаються з полярних молекул, які змочуються водою. Суцільна водяна плівка, що виникає на поверхні такого матеріалу, змінює його основні характеристики: зменшує поверхневий питомий опір, збільшує діелектричні втрати та діелектричну проникність. Гідрофобні матеріали складаються з неполярних молекул, які відповідно не змочуються водою. На поверхні такого матеріалу вода збирається у вигляді ізольованих краплинок. В результаті цього електрофізичні властивості матеріалу залишаються незмінними при взаємодії з вологою.

Якщо матеріал не містить в своєму об'ємі водорозчинних солей та пор, то об'ємне вологопоглинання підпорядковується законам вільної дифузії. Для сухого матеріалу товщиною d загальна кількість поглинутої води $Q(t)$ за час t дорівнює:

$$Q(t) = Q_m [1 - 8/\pi^2 \exp(-t \pi^2 D/d^2)], \quad (14)$$

де Q_m – межа розчинності води в матеріалі, D – коефіцієнт дифузії вологи в матеріалі.

На межі поділу фаз мають місце сорбційні процеси, серед яких виділяють адсорбцію та абсорбцію. Адсорбція – це поверхневе поглинання речовини іншою речовиною. Коли ж одна речовина поглинається всім об'ємом іншої речовини, то має місце абсорбція. Речовина, здатна поглинати іншу речовину, називається адсорбентом, речовина, яка може адсорбуватися – адсорбтивом, а вже адсорбована речовина – адсорбатом. Процес, зворотній адсорбції, називається десорбцією.

В залежності від природи сил взаємодії речовини, що адсорбується, та адсорбенту розрізняють фізичну та хімічну адсорбцію. Якщо адсорбція обумовлена силами електростатичного походження, то вона відноситься до фізичної адсорбції. Коли ж адсорбована молекула зв'язана з адсорбентом силами обмінної взаємодії (ковалентні, іонні зв'язки), то вона називається хімічною адсорбцією або хемосорбцією.

Ці два види адсорбції мають ряд відмітних ознак. Оскільки сили хімічного зв'язку міцніші, ніж сили фізичного притягання, то теплота хемосорбції вища, ніж теплота фізичної адсорбції. Під час хімічної адсорбції здійснюється перенесення електронів між адсорбентом та адсорбатом, тоді як за фізичної адсорбції таке перенесення не відбувається. Крім того, хемосорбція як хімічна реакція, може потребувати помітної енергії активації. В цьому випадку вона протікатиме з помітною швидкістю лише вище певної температури. Фізична ж адсорбція не потребує енергії активації. І, нарешті, величина хемосорбції не перевищує моношар молекул, так як хімічно ненасичена поверхня може бути насичена в результаті адсорбції одного шару молекул. Для фізичної адсорбції таких обмежень немає. Якщо відомо, що величина адсорбції перевищує моношар, то принаймні другий та наступні шари адсорбуються фізично.

Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд для дослідження роботи діелектричних сенсорів вологи складається з дозатора H_2O , діелектричного сенсора вологи та двох наповнювачів (паперового і поліамідного), вимірювачів ємності та $tg\delta$, а також таймера. Схема лабораторного стенду наведена на рис.2.

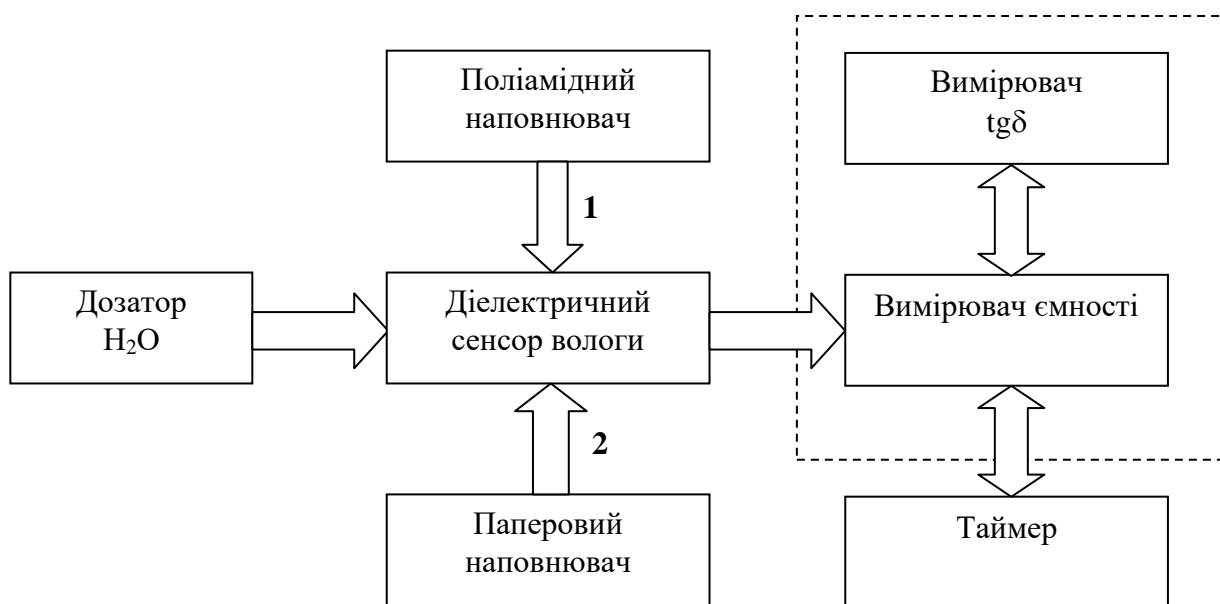


Рисунок 2 – Блок-схема лабораторного стенду:

- 1 – варіант поліамідного наповнювача вакуумного конденсатора сенсора вологи,
- 2 – варіант паперового наповнювача вакуумного конденсатора сенсора вологи

Діелектричний сенсор вологи представляє собою планарний вакуумний конденсатор, між обгортками якого по черзі розташовується поліамідний та паперовий наповнювач. За допомогою дозатора H_2O наповнювач зволожується. В залежності від вологопоглинальних властивостей наповнювача (гідрофобність, гідрофільність) ємність конденсатору та діелектричні втрати матеріалу зазнають певних змін, що реєструється за допомогою вимірювача ємності та $tg\delta$. Таймер використовується для вимірювання часової залежності процесу адсорбції вологи.

Для визначення ємності та $\operatorname{tg}\delta$ використовується вимірювач ємності цифровий Е8-4, в якому об'єднано обидва вимірювання. Даний прилад дає можливість вимірювати ємність в широкому діапазоні від 0,03 пФ до 15,999 мкФ, а також тангенс кута діелектричних втрат в межах $5 \cdot 10^{-4} \dots 999 \cdot 10^{-4}$. В якості вимірювача часу використовується таймер-секундомір ТФА 38202202, максимальний відлік часу якого становить 99 хв 59 с.

Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути вимірювач ємності Е8-4, здійснити калібрування приладу, перейти в періодичний режим вимірювання.
2. Розмістити поліамідний наповнювач між обгортками конденсатору сенсора вологості.
3. За допомогою вимірювача ємності Е8-4 виміряти початкове значення ємності конденсатору та величину діелектричних втрат в поліаміді.
4. Нанести на поверхню діелектрика за допомогою дозатора 1...2 мл води.
5. За допомогою вимірювача ємності Е8-4 здійснити вимірювання зміни ємності та тангенсу кута діелектричних втрат сенсору вологості при потраплянні вологи на поліамідний наповнювач. Вимірювання здійснювати на протязі 20 хв з інтервалом 30 с.
6. Розмістити паперовий наповнювач між обгортками конденсатору сенсора вологості.
7. За допомогою вимірювача ємності Е8-4 виміряти початкове значення ємності конденсатору та величину діелектричних втрат в папері.
8. Нанести на поверхню діелектрика за допомогою дозатора 1...2 мл води.
9. За допомогою вимірювача ємності Е8-4 здійснити вимірювання зміни ємності та тангенсу кута діелектричних втрат сенсору вологості при

потраплянні води на паперовий наповнювач. Вимірювання здійснювати на протязі 20 хв з інтервалом 30 с.

10. Вимкнути вимірювач ємності E8-4.

Обробка результатів вимірювання

1. Скласти таблиці результатів для вимірювання сенсору вологості з поліамідним та паперовим наповнювачами.
2. Побудувати суміщені графіки залежності ємності конденсатору сенсора вологості від часу для паперового та поліамідного наповнювачів.
3. Побудувати суміщені графіки залежності діелектричних втрат від часу в паперовому та поліамідному наповнювачах.
4. Встановити вологопоглинальні властивості діелектричних наповнювачів конденсатору, які використовувались в даній роботі. Зробити висновок про можливість використання даних матеріалів в сенсорах вологості.

Контрольні запитання

1. Що таке гігрометр? Які види гігрометрів Ви знаєте?
2. В яких одиницях вимірюють вологість газу?
3. Що являє собою резистивний метод вимірювання вологості?
4. В чому полягає ємнісний метод вимірювання вологості?
5. Який матеріал називається гідрофобним? Наведіть приклади таких матеріалів.
6. Який матеріал називається гідрофільним? Наведіть приклади таких матеріалів.

7. Як змінюються характеристики гідрофільного та гідрофобного матеріалу при поглинанні вологи?
8. Від яких параметрів залежить кількість поглинутої вологи гідрофільним матеріалом?
9. Дайте визначення поняттям “адсорбція”, “абсорбція”, “адсорбент”, “адсорбтив”, “адсорбат”, “десорбція”.
10. Які види адсорбції Ви знаєте? Порівняйте їх між собою.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Оптичні сенсори газу (рідини)

Мета роботи – за допомогою інфрачервоного сенсору дослідити стан свого подиху та шкіри.

Короткі теоретичні відомості

Оптичні методи вимірювання концентрації та складу суміші ґрунтуються на взаємодії світла, як електромагнітного випромінювання, з досліджуваною речовиною. При аналізі рідких і газоподібних середовищ із зміною складу та концентрації змінюються умови відбивання, поглинання, розсіювання чи заломлення видимих, інфрачервоних або ультрафіолетових променів.

При проходженні електромагнітної хвилі через простір з рівномірно розподіленою речовиною її параметри – швидкість поширення та амплітуда можуть змінюватися, а частота залишається незмінною. Зміна швидкості чи амплітуди характеризується, відповідно, коефіцієнтом заломлення чи поглинання. Ці дві величини пов'язані між собою через частоту абсорбції в атомах і молекулах, а тому можуть подаватися у вигляді комплексного коефіцієнта заломлення, який при вибраних умовах вимірювання (довжина хвилі, температура) є однозначною для кожної з речовин величиною. Якщо на шляху хвилі випромінювання є тіло з анізотропним розподілом речовини (лінійне, кругове, подвійне заломлення), тоді для точного математичного опису стану хвилі доводиться вводити декілька комплексних коефіцієнтів заломлення.

Інтенсивність поглинутого випромінювання визначає концентрацію даного газу згідно закону Бугера — Ламберта — Бера, який визначає послаблення

паралельного монохроматичного променя світла при поширенні його в поглинаючому середовищі:

$$I(l) = I_0 e^{-\alpha l}, \quad (15)$$

де I_0 – інтенсивність падаючого променя, l – товщина шару речовини (або довжина кювети з газом), через який проходить світло, α – коефіцієнт поглинання.

До оптичних методів вимірювання концентрації та складу сумішей відносять: рефрактометричний, поляриметричний, нефелометричний, колориметричний та спектральний методи.

Рефрактометричний метод базується на залежності коефіцієнта заломлення світла від складу та концентрації газу/рідини. Суть цього методу полягає в тому, що при відсутності досліджуваної речовини, ІЧ промінь, що падає на призму, зазнає повного внутрішнього відбивання. Відбитий промінь виходить з призми і реєструється тепловим приймачем. Якщо на межі з призмою з'являється інша речовина (газ, рідина), умови повного внутрішнього відбивання порушуються. В результаті частина променів потрапляє в досліджуваний газ/рідину, що змінить характеристики вихідного променя, який реєструється тепловим приймачем.

Поляриметричний метод ґрунтується на залежності кута обертання площини поляризації світла в досліджуваній пробі від її складу. Відомо, що при проходженні лінійно поляризованого світла через оптично активні речовини, відбувається поворот коливань електричного вектора світлового променя. Тому за зміною кута повороту площини поляризації можна зробити висновок щодо концентрації досліджуваної речовини за законом Біо:

$$\varphi_\lambda = \varphi_{\lambda 0} \cdot \frac{c}{100} \cdot d \quad (15)$$

де φ_λ – кут повороту площини поляризації, c – концентрація оптично активної речовини, розчиненої в оптично неактивному розчиннику, d – товщина проби досліджуваної речовини, λ – довжина хвилі електромагнітного випромінювання, $\varphi_{\lambda 0}$ – питома обертаність розчину (його значення зведені в таблицях).

Нефелометричний метод базується на вимірюванні прозорості проби досліджуваної речовини. Вимірювання здійснюється через порівняння сили спрямованого на пробу світла та пропущеного чи розсіяного цією речовиною світла. Метод дозволяє встановити концентрацію твердих чи газоподібних домішок в рідинах, а також крапель мряки чи окремих часток у газі (димоміри).

Колориметричний метод ґрунтується на визначенні інтенсивності забарвлення проби у прохідному або відбитому світлі. Проба в даному методі являє собою продукт селективної реакції між речовиною, що визначається, і спеціально підібраним реагентом. Вимірювання може проводитись або через суб'єктивне порівняння забарвлення, або за допомогою фотоелементів.

Спектральний метод базується на вибіркового випусканні або поглинанні різними речовинами випромінювання із заздалегідь відомими довжинами хвиль. Вибірковість поглинання газом електромагнітного випромінювання пов'язана з квантованою природою енергетичного спектру молекул, з яких складається даний газ. В молекулі розрізняють наступні види рухів: електронний рух (рух електронів навколо ядра в атомах молекули), коливальний рух (рух атомів навколо хімічного зв'язку в молекулі), обертальний рух (рух самої молекули чи її частини). Кожний з цих рухів є квантованим, тобто молекула має певний набір дискретних енергетичних рівнів, між якими можливі переходи. При цьому зовнішній прояв квантованості енергетичного спектру полягає у поглинанні дозволених квантів енергій. Поглинання видимого, ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання викликає зміну електронної енергії молекули, в той час як поглинання ІЧ випромінювання супроводжується зміною коливальних та обертальних станів молекул. Ці ефекти лежать в основі так званої абсорбційної

спектроскопії, в якій по отриманим спектрам поглинання робиться однозначний висновок про природу газу.

Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд для дослідження газу (рідини) за допомогою ІЧ сенсору складається з призми, джерела та приймача ІЧ-випромінювання, джерела постійного струму, амперметра та таймеру. Схема лабораторного стенду наведена на рис.3.

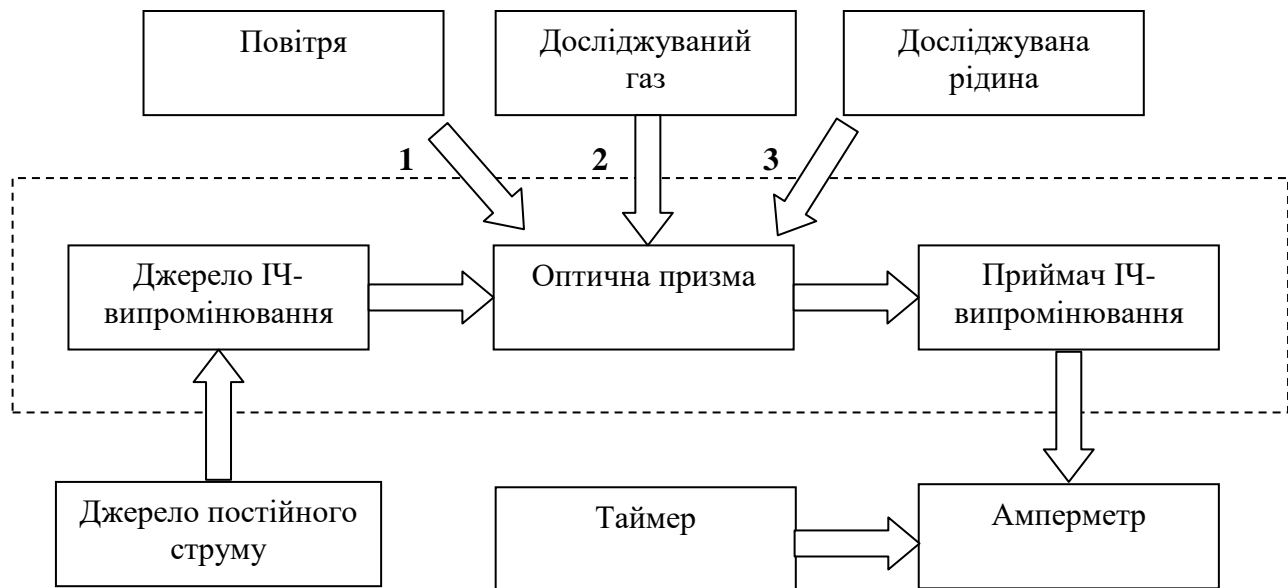


Рисунок 3 – Блок-схема лабораторного стенду:

1 – початковий режим роботи ІЧ-сенсора, 2 – режим дослідження газу,
3 – режим дослідження рідини

ІЧ-сенсор газу (рідини) представляє собою оптичну призму, джерело та приймач ІЧ-випромінювання, змонтовані на спільній пластиковій платформі таким чином, щоб при контакті робочої поверхні призми з повітрям виконувався закон повного внутрішнього відбивання. Для живлення ІЧ-сенсора

використовується джерело постійного струму, а для реєстрації вихідного сигналу ІЧ-сенсора – амперметр. Студентам пропонується дослідити стан свого подиху та шкіри за допомогою ІЧ-сенсора. При появі на робочій поверхні призми газу чи рідини закон повного внутрішнього відбивання порушується і частина ІЧ-променів виходить з призми в досліджуване середовище, в результаті чого вихідний сигнал сенсора зменшується. Таймер використовується для вимірювання кінетики десорбції парів газу з поверхні призми.

Для створення ІЧ-сенсору газу (рідини) використовується світлодіод IR17-21С як джерело та фотодіод ФД-9К як приймач ІЧ випромінювання. В якості джерела постійного струму використовується ИПТ Б5-49, який дає змогу подавати напругу на ІЧ-сенсор в діапазоні 0...99,9 В та струм в межах 0...999 мА. Для вимірювання постійного струму ІЧ-сенсору використовується мікроамперметр М2027, робочий діапазон якого 0...100 мкА. В якості вимірювача часу використовується таймер-секундомір ТФА 38202202, максимальний відлік часу якого становить 99 хв 59 с..

Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути джерело постійного струму ИПТ Б5-49, виставити вихідну напругу 3 В.
2. Виміряти передаточну характеристику ІЧ-сенсору газу – залежність вихідного струму сенсора від струму на його вході. Вхідний струм змінювати в межах 5...80 мА з кроком 5 мА. На передаточній характеристиці обрати робочу точку сенсора.
3. Дослідити кінетику десорбції парів газу, адсорбованого на робочій поверхні призми ІЧ-сенсора під час видиху людини. При цьому кожному студенту підгрупи пропонується вивчити стан свого подиху шляхом вимірювання за допомогою мікроамперметра М2027 та таймера залежності вихідного

струму сенсору від часу в процесі десорбції. Після кожного вимірювання робочу поверхню призми ІЧ-сенсора потрібно ретельно очищати.

4. Вивчити стан шкіри кожного із студентів підгрупи за допомогою ІЧ-сенсора. Для цього потрібно виміряти за допомогою мікроамперметра М2027 відхилення струму сенсора від робочої точки при дотику пальцем до його робочої поверхні. Після кожного вимірювання робочу поверхню призми ІЧ-сенсора потрібно ретельно очищати.
5. Вимкнути джерело постійного струму ИПТ Б5-49.

Обробка результатів вимірювання

1. Побудувати передаточну характеристику ІЧ-сенсору газу, позначити на ній робочу точку сенсора.
2. Побудувати суміщений графік часової залежності процесу десорбції подиху кожного студента підгрупи. Зробити висновок про стан подиху студентів.
3. Заповнити таблицю показів ІЧ-сенсора при дотику пальцем всіх студентів підгрупи. Зробити висновок про стан шкіри студентів (кількість та вид поглинальних центрів).

Контрольні запитання

1. На чому ґрунтуються оптичні методи вимірювання концентрації та складу газової суміші?
2. Які параметри електромагнітної хвилі змінюються при проходженні крізь простір з рівномірним розподілом досліджуваної речовини?
3. Які Ви знаєте різновидності оптичних методів вимірювання концентрації та складу газової суміші?
4. В чому полягає рефрактометричний метод аналізу газової суміші?

5. Який закон лежить в основі поляриметричного методу аналізу речовини?
6. На чому ґрунтується нефелометричний метод аналізу газової суміші?
Вкажіть області його застосування.
7. В чому полягає колориметричний метод аналізу речовини?
8. Поясніть фізичну суть спектрального методу аналізу газів та рідин.
9. Що таке абсорбційна спектроскопія? Яке її практичне значення?
10. Напишіть математичний вираз закону Ламберта-Бугера-Берра. Який його фізичний зміст?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Електрохімічні сенсори

Мета роботи – дослідити процеси, що відбуваються в гальванічній електрохімічній комірці з однорідним та неоднорідним електролітом.

Короткі теоретичні відомості

В основі електрохімічних методів аналізу лежить дослідження процесів, які протікають в електролітах на поверхні занурених в них електродів. Ці процеси можуть бути рівноважними або нерівноважними в залежності від умов експерименту і давати інформацію про швидкість хімічної реакції, природу з'єднань, термодинаміку процесу тощо.

Існують суттєві відмінності хімічних та електрохімічних процесів. Хімічні реакції характеризуються наступними ознаками: реакція можлива тільки в результаті зіткнення її учасників один з одним; шлях, який долає електрон при такому переході, дуже малий; зіткнення можуть відбуватися в будь-яких точках реакційного простору і при будь-яких взаємних положеннях реагуючих частинок; енергетичний ефект хімічних реакцій – теплота.

Електрохімічні реакції мають ряд особливостей порівняно зі звичайними хімічними процесами. Обов'язковою умовою спостереження електрохімічних реакцій, які пов'язані з отриманням чи віддачею електричної енергії, є протікання струму. При цьому учасники реакції не вступають у безпосередній контакт між собою, а мають бути просторово розмежовані. Натомість вони вступають в контакт з електродами, які з'єднані між собою металевим провідником. Таким чином, в електрохімічних реакціях електрони передаються від відновника до

окисника по спеціальному шляху. Для того, щоб струм протікав неперервно, необхідно забезпечити протікання струму і через реакційний простір, який складається з учасників реакції та спеціально доданих сполук, що характеризуються високою іонною провідністю (електроліт). Таким чином, електрохімічним процесам властиві наступні особливості – учасники реакції просторово розмежовані, електрон долає значний шлях від відновника до окисника, реакція характеризується чіткою направленістю та енергетичним ефектом є електрична енергія.

Спеціальна електрохімічна система, яка забезпечує протікання електрохімічної реакції, називається електрохімічною коміркою. В загальному випадку електрохімічна комірка являє собою два електроди, кожний з яких розташований в електроліті. Електроліт – це провідник II роду, який в розчині чи розплаві складається повністю або частково з іонів, і характеризується відповідно іонною провідністю. Ця частина електрохімічної комірки називається внутрішнім колом системи і складається з двох відділень – анодного та катодного, які розділені іонопроникною мембраною (соляним мостиком), що не перешкоджає руху іонів, але попереджає перемішування розчинів. Електроди виготовляють з платини, графіту тощо і забезпечують обмін електронами між учасниками реакції. Електрохімічна комірка містить металевий провідник (провідник I роду), який з'єднує електроди та забезпечує проходження струму по зовнішньому колу системи. Електрод, на якому відбувається реакція окислення називається анодом, а електрод, на якому відбувається реакція відновлення – катодом. Атоми або іони, які в даній реакції приєднують електрони, називаються окисниками, а які віддають електрони - відновниками.

На межі поділу електроно- та іонопровідних фаз виникає різниця потенціалів внаслідок переходу заряджених частинок з однієї фази в іншу. Ця різниця потенціалів називається електродним потенціалом. Різниця потенціалів двох електродів являє собою електрорушійну силу (ЕРС) електрохімічної комірки.

Однак виміряти чи розрахувати скачок потенціалу на кожній окремо взятій границі принципово неможливо. Тому вводять поняття стандартного електродного потенціалу, що являє собою ЕРС електрохімічної комірки, що складається з досліджуваного електрода та стандартного (водневого) електрода. Стандартний електродний потенціал – це такий потенціал, який виникає на межі металу з розчином його іонів при концентрації останніх 1 моль/л. По величині стандартного електродного потенціалу всі метали розміщені в ряд, по якому можна встановити в якому напрямку піде реакція, а також розрахувати ЕРС електрохімічної комірки.

В електрохімічній комірці один з електродів поміщається в досліджуваний розчин і називається індикаторним, а інший електрод – це порівняльний електрод, відносно якого вимірюється потенціал індикаторного електроду.

Електрохімічні комірки бувають двох типів – гальванічні та електролітичні (електролізери). В гальванічному елементі хімічні реакції на межі поділу електрод-електроліт протікають самочинно, а в електролітичній комірці – при використанні зовнішнього електричного джерела живлення. В гальванічному елементі має місце перетворення хімічної енергії в електричну, а в електролізері, навпаки, перетворення електричної енергії в хімічну енергію.

Найбільш широко в аналітичній хімії використовують наступні електрохімічні методи: потенціометричний, амперометричний, кондуктометричний та кулонометричний метод.

Потенціометричний метод ґрунтується на вимірюванні різниці потенціалів між індикаторним електродом і електродом порівняння при відсутності струму в електрохімічному ланцюгу. За цих умов система, що аналізується, знаходиться у рівновазі, і електродний потенціал пов'язаний з концентрацією розчину рівнянням Нернста:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{Ox}}{a_{Red}} \quad (16)$$

де E – електродний потенціал, E^0 – стандартний електродний потенціал, R – універсальна газова стала, T – абсолютна температура, n – кількість електронів, що приймають участь в реакції, F – постійна Фарадея, a – активність іона (Ox та Red – окисленої та відновленої форми).

В потенціометрії розрізняють дві групи методів: пряма потенціометрія або іонометрія та потенціометричне титрування. Метод прямої потенціометрії ґрунтується на визначенні концентрації досліджуваного іона за величиною ЕРС електрохімічного кола. Потенціометричне титрування ґрунтується на вимірюванні кількості реагента, який повністю прореагує з аналізованою речовиною. Суть титрування зводиться до індикації точки еквівалентності за зміною ЕРС потенціометричної комірки. Поблизу точки еквівалентності має місце різкий стрибок електродного потенціалу. Потенціометричне титрування має ряд переваг порівняно з методом прямої потенціометрії: вища точність вимірювання, можливість проведення вимірювань непрозорих розчинів та визначення речовин, для яких відсутні іоноселективні електроди, шляхом підбору відповідних титрантів.

В потенціометрії використовують два типи електродів – електроннообмінні та іонообмінні (іоноселективні). При використанні електроннообмінних електродів вимірювана ЕРС електрохімічної комірки свідчитиме про концентрацію всіх іонів даного знаку, не залежно від їх природи. Іоноселективний електрод забезпечує вибіркове вимірювання концентрації іонів певних хімічних елементів у розчинах. Основним елементом іоноселективного електроду є іоночутлива мембрана, тому такі електроди називаються ще мембранними.

Прикладом застосування іоноселективного електроду зі скляною мембраною є рН-вимірювач. Важливою характеристикою будь-якого розчину є його водневий показник (рН), який являється мірою активності іонів водню в розчинах:

$$pH = -\lg(a_{H^+}) \quad (17)$$

Для дистильованої води та нейтральних розчинів активність обох груп іонів (H^+ та OH^-) співпадає, в кислому та лужному середовищах рівність порушується. Так, для кислого розчину активність іонів водню є вищою, аніж активність гідроксильних груп, для лужних розчинів – навпаки. Звідси рН кислотних розчинів менше 7, для лужних розчинів рН є більше 7.

Амперометричні методи ґрунтуються на вимірюванні струму в електрохімічній комірці при постійній напрузі, який пропорційний концентрації іонів розчину. Конструктивно амперометричний сенсор не відрізняється від потенціометричного. Розрізняють пряму амперометрію та амперометричне титрування, при цьому точка еквівалентності визначається за різкою зміною струму в процесі титрування. Електрохімічні комірки, які працюють за принципом амперометрії, використовують в якості датчиків в рідинній хроматографії.

Кондуктометричний метод ґрунтується на вимірюванні електропровідності розчину. Умови досліду підбираються таким чином, щоб найбільший внесок в потенціал комірки вносило падіння напруги на розчині, а не стрибок потенціалу на кордоні електрод/розчин. При цьому електропровідність однокомпонентного розчину можна однозначно пов'язати з його концентрацією. Широко використовується кондуктометричне титрування, коли до розчину, що аналізується, порціями додають відомий реагент і слідкують за зміною електропровідності.

В кулонометрії проводять повний електроліз розчину при контрольованому потенціалі і вимірюють кількість електрики, необхідної для цього. Кількість речовини визначають за допомогою закону Фарадея:

$$m = \left(\frac{Q}{F} \right) \cdot \left(\frac{M}{z} \right) \quad (18)$$

де m — маса речовини, що виділилась на електроді, Q — повний електричний заряд, що пройшов крізь речовину, F – постійна Фарадея, M – молярна маса речовини, z — кількість електронів, які приймають участь у перетворенні однієї молекули. В кулоногравиметрії кількість речовини, на яку вплинув електроліз, визначають зважуванням електроду до і після експерименту.

Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд для дослідження роботи електрохімічних сенсорів складається з електрохімічної комірки, джерела постійного струму, амперметра та рН-метра. Схема лабораторного стенду наведена на рис.4.

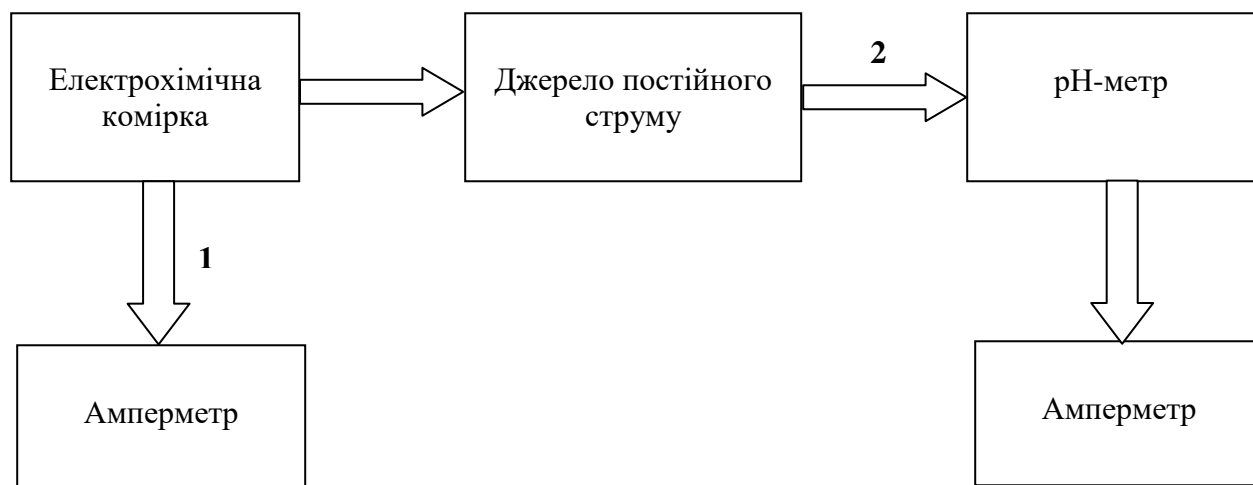


Рисунок 4 – Блок-схема лабораторного стенду:

1 – випадок однорідного електроліту, 2 – випадок неоднорідного електроліту

Електрохімічна комірка являє собою систему електродів (алюмінієві, мідні), два з яких розміщені в посудині з однорідним електролітом. Катодне та анодне відділення розмежовується соляним мостиком. За допомогою амперметра вимірюється величина струму в електрохімічній комірці з однорідним електролітом за різної комбінації алюмінієвих та мідних електродів. Для забезпечення неоднорідності електроліту за розподілом іонів, в електрохімічній комірці проводять електроліз. Для цього використовують систему графітових електродів і створюють струм за допомогою джерела постійного струму. Неоднорідність електроліту в анодному та катодному відділенні фіксується рН-метром. За допомогою амперметра вимірюється величина струму в електрохімічній комірці з неоднорідним електролітом за різної комбінації алюмінієвих та мідних електродів.

В якості джерела постійного струму використовується ИПТ Б5-50, який дає змогу керувати струмом при електролізі в діапазоні 0...299 мА та подавати напругу в діапазоні 0...299 В. Для вимірювання постійного струму використовується мікроамперметр М93, який дає змогу вимірювати відхилення струму від нуля до 50 мкА в обидва боки. Величина рН електроліту в катодному та анодному відділенні вимірюється рН-метром РН009 з діапазоном вимірювання кислотності 0...14 рН та ціною поділки 0,1 рН.

Порядок виконання роботи

1. Помістити пару електродів з системи алюміній-мідних електродів в катодне та анодне відділення електрохімічної комірки з однорідним електролітом.
2. За допомогою мікроамперметра М93 виміряти струм в електрохімічній комірці з однорідним електролітом для різних електродних пар: Cu-Cu, Al-Cu, Cu-Al.

3. Помістити систему на основі графітових електродів в катодне та анодне відділення електрохімічної комірки, під'єднати джерело постійного струму Б5-50.

4. Ввімкнути джерело постійного струму Б5-50, виставити на ньому вихідний струм 50 мА, вихідну напругу 50 В.

5. Провести процес електролізу на протязі 10...15 хв.

6. Вимкнути джерело постійного струму Б5-50.

7. За допомогою рН-метру визначити рівень рН електроліту в катодному та анодному відділенню електрохімічної комірки.

8. Помістити пару електродів з системи алюміній-мідних електродів в катодне та анодне відділення електрохімічної комірки з неоднорідним електролітом.

9. За допомогою мікроамперметра М93 виміряти струм в електрохімічній комірці з неоднорідним електролітом для різних електродних пар: Cu-Cu, Al-Cu, Cu-Al.

Обробка результатів вимірювання

1. Скласти таблицю струмів електрохімічної комірки з різними електродними парами для випадку однорідного та неоднорідного електроліту.

2. На основі таблиці стандартних електродних потенціалів розрахувати ЕРС електрохімічної комірки з різними електродними парами.

3. Зробити висновок про рівень кислотності електроліту в катодному та анодному відділенню електрохімічної комірки.

4. На основі складеної таблиці пояснити процеси, які відбуваються в електрохімічній комірці з різними електродними парами для випадку однорідного та неоднорідного електроліту.

Контрольні запитання

1. Вкажіть на принципові відмінності хімічних та електрохімічних процесів.
2. Що собою являє електрохімічна комірка?
3. Які види електрохімічних комірок Ви знаєте?
4. Що таке стандартний електродний потенціал?
5. В чому суть потенціометричних методів аналізу рідин?
6. Які різновиди потенціометричних методів аналізу рідин Ви знаєте?
7. Що таке електроннообмінний та іоноселективний електрод?
8. Що собою являє амперометричний метод аналізу рідин?
9. В чому суть кондуктометричних методів аналізу рідин?
10. Який закон лежить в основі кулонометричного методу аналізу рідин?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

Сенсори освітленості

Мета роботи – отримати практичні навички роботи з сенсорами освітленості резистивного та діодного типу, здійснити їх калібрування та визначити основні характеристики.

Короткі теоретичні відомості

Датчик освітленості або сутінковий вимикач – це пристрій автоматичного управління джерелом світла в залежності від рівня освітленості навколишнього простору. Структура сутінкового вимикача досить проста і умовно може бути розбита на три основні складові: фотоприймач (фотодіод, фоторезистор, фототранзистор), пороговий пристрій (компаратор), вихідний пристрій (реле або сімістор). Принцип роботи датчика освітленості полягає в тому, що при зміні параметрів фотоелемента спрацьовує граничний пристрій (компаратор), який подає сигнал на вихідний пристрій, що і включає освітлення. Наприклад, при природному освітленні опір фоторезистора низький і напруга на ньому не перевищує порогу спрацювання компаратора, тому штучне освітлення відключене. Зменшення природного освітлення призводить до зростання опору фоторезистора і відповідно напруги на ньому. В певний момент (за певного рівня освітленості) рівень напруги на фоторезисторі досягає порогу спрацювання компаратора, який за допомогою реле включає штучне освітлення.

Датчики освітленості встановлюються в місцях, де в денний час доби простір освітлюється природним світлом, а при настанні темряви – штучним світлом: для вуличного освітлення тротуарів, дворів житлових будинків, дитячих

майданчиків; для освітлення автомагістралей; для контролю ілюмінації рекламних щитів; для підсвічування вітрин тощо. Завдяки автоматичному спрацюванню включення штучного джерела світла, з яким взаємодіє датчик освітлення, споживання електрики зводиться до необхідного мінімуму.

Сучасні сутінкові вимикачі можуть бути обладнані додатковими датчиками, які значно розширюють робочі функції цих приладів (датчики руху, таймери тощо). Наприклад, якщо разом з фотореле працює датчик руху, то вуличний ліхтар включається в темний час доби за наявності в полі зору рухомих об'єктів. Для уникнення автоматичного відключення вуличної реклами при світлі автомобільних фар використовується так звана функція затримки вимкнення, яка полягає в тому, що коли рівень освітлення зростає до рівня виключення, в контролері активується відлік на встановлений термін, і якщо рівень освітлення з часом не змінився, тоді фотореле вводиться в дію (штучне освітлення вмикається). Фотореле з функцією таймера може вмикати/вимикати штучне освітлення не тільки виходячи з рівня освітлення, але й в чітко визначений час. Наприклад, підсвітка реклами автоматично відключається після півночі через її неефективність в цей час доби).

Фотоприймачі, які використовуються в датчиках освітленості, працюють на явищі внутрішнього фотоефекта і по суті здійснюють перетворення енергії електромагнітного випромінювання в електричну енергію. Якщо енергія падаючих фотонів є більшою, аніж ширина забороненої зони матеріалу, то в результаті взаємодії фотонів з атомами речовини будуть вивільнятися носії заряду, що можуть переміщатись всередині матеріалу під дією електричного поля (явище внутрішнього фотоефекту). В фотоприймачах цей ефект проявляється у вигляді зростання їх питомої провідності під час опромінення внаслідок зростання кількості вільних носіїв заряду (фотоносіїв).

В якості фотоприймачів в датчиках освітленості використовуються фоторезистори або фотодіоди. Фоторезистор – це напівпровідниковий резистор,

принцип дії якого базується на зміні опору напівпровідника під дією світла. У фоторезисторі за рахунок внутрішнього фотоефекту зростає кількість вільних носіїв заряду, а тому електричний опір матеріалу приладу зменшується. Залежність електричних властивостей фоторезистора від параметрів світлового потоку виражається на світловій ВАХ (рис.5, а). Фоторезистор характеризується високою чутливістю, однак низькою швидкістю.

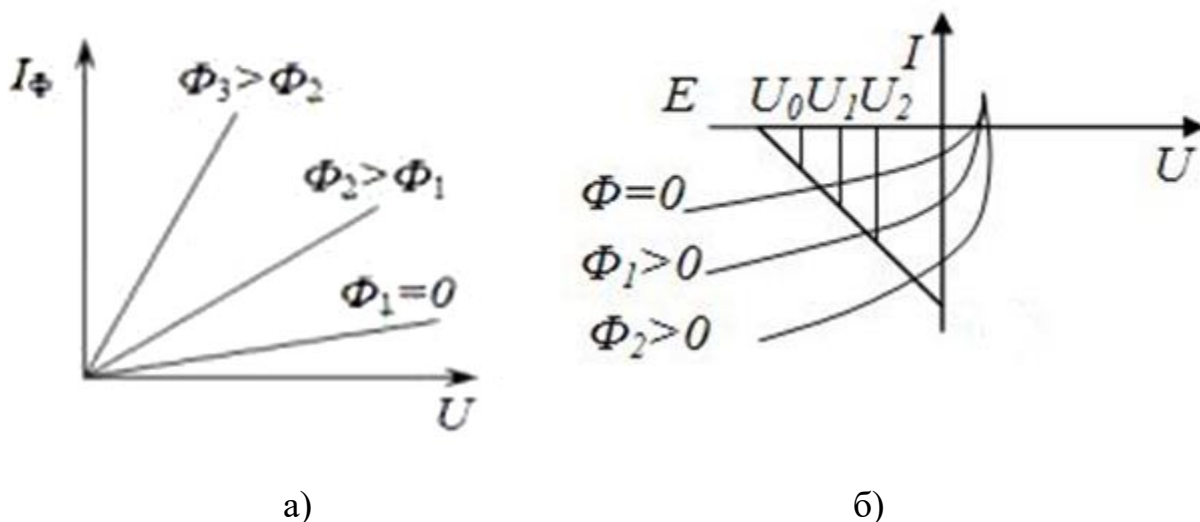


Рисунок 5 – Світлові та темнові ВАХ фоторезистора (а) та фотодіода (б)

Фотодіод – це напівпровідниковий діод, принцип дії якого ґрунтується на зміні зворотнього струму р-п-переходу в залежності від інтенсивності падаючого світла. В результаті поглинання фотонів з енергією, більшою, ніж ширина забороненої зони, в п-області з'являються електронно-діркові пари, які розділяються електричним полем р-п-перехода наступним чином: дірки переходять в р-область, а електрони залишаються в п-області. В результаті струм через р-п-перехід викликаний дрейфом неосновних носіїв – дірок. Дрейфовий струм фотоносіїв називають фотострумом, величина якого залежить від рівня освітленості (рис.5, б). На відміну від фоторезисторів фотодіоди характеризуються вищою швидкістю.

Основним фоточутливим параметром фотоприймачів є коефіцієнт фоточутливості, який визначається по люкс-амперній характеристиці (ЛАХ) за формулою:

$$K_{\phi} = \frac{I_{\phi 2} - I_{\phi 1}}{(\Phi_2 - \Phi_1) \cdot U} = \frac{I_{\phi 2} - I_{\phi 1}}{(E_2 - E_1) \cdot S \cdot U}, \quad (19)$$

де K_{ϕ} – коефіцієнт фоточутливості, А/лмВ; I_{ϕ} – фотострум; Φ – світловий потік; E – освітленість; S – площа зразку; U – напруга, при якій проводились вимірювання ЛАХ.

Опис лабораторного стенду

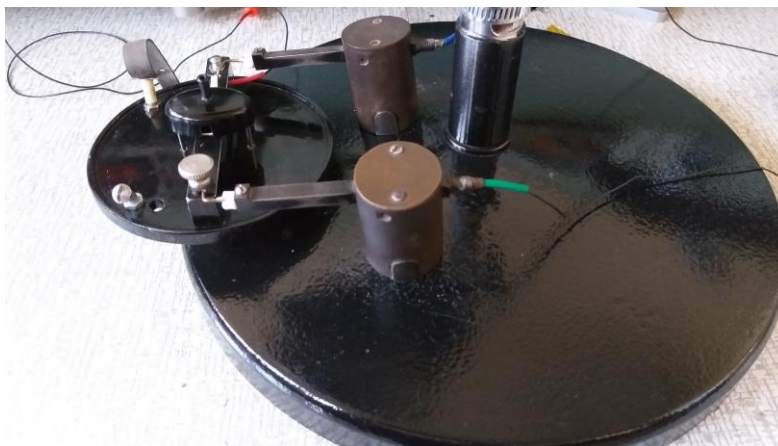
Лабораторний стенд для дослідження сенсорів освітленості складається з наступних приладів:

- 1) Люксметр цифровий LX1010BS;
- 2) Освітлювач з предметним столиком та системою зондів на магнітах;
- 3) Джерело постійного струму Б5-47;
- 4) Мультиметр цифровий В7-35.

Освітлювач складається з опорної плити, на якій розміщуються предметний столик та система зондів на магнітах (рис.6, а), а також вертикальний шток зі шкалою в см (рис.6, б) і джерело світла (рис.6, в).

Предметний столик призначений для розміщення лабораторних зразків і вимірювання їх характеристик. Структура столика наступна (рис.6, а): алюмінієвий тепловідвід з посрібленою поверхнею (для електричного з'єднання з тильним контактом лабораторного зразку), зачорнений екран (для вимірювання темнових характеристик) та система магнітних зондів (притискні голчасті контакти для електричного з'єднання з фронтальними контактами лабораторного зразку). Максимальний розмір дослідних зразків становить 12*17 мм.

Джерело світла (рис.6, в) закріплене на рухомій каретці вертикального штоку і може переміщатись вздовж нього. Відстань від джерела світла до предметного столику визначається по краю каретки на шкалі (відповідний рівень позначений червоною крапкою, рис.6, б). Діапазон переміщення освітлювача по вертикалі до предметного столику становить 3...18 см.



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Структура освітлювача: а) опорна плита, предметний столик, система зондів на магнітах, б) вертикальний шток зі шкалою в см, в) джерело світла

Величина освітленості зразку вимірювалась за допомогою цифрового люксметра LX1010BS. Порядок роботи з цим приладом наступний:

1. Зняти пластикову кришку корпусу сенсора світла з написом “Open”.
2. Ввімкнути прилад за допомогою перемикача “ON”.
3. Розмістити сенсор світла на робочому столику і ввімкнути освітлювач так, як це показано на рис.7.



Рисунок 7 – Зображення розташування люксметра для калібрування джерела світла

4. Встановити необхідний діапазон вимірювання освітленості за допомогою перемикача діапазонів “2000 / 20 000 / 100 000” і користуючись табл..1 встановити заданий рівень освітленості.
5. Провести калібрування освітлювача, тобто виміряти величину освітленості люксометром на різних рівнях розміщення джерела світла.
6. Після завершення вимірювань закрити сенсор світла пластиковою кришкою.
7. Вимкнути люксметр за допомогою перемикача “OFF”.

Таблиця 1 – Технічні характеристики люксметра LX1010BS

Перемикач діапазону	Множник діапазону	Величина освітленості, лк	Роздільна здатність, лк
2 000	x1	0...1 999	1
20 000	x10	2 000...19 999	10
100 000	x100	20 000...100 000	100

Порядок виконання роботи

11.Ввімкнути вимірювальне обладнання лабораторного стенду.

12.Здійснити калібрування освітлювача.

2.1. Виставити лампу за допомогою ручки на рухомому штативі на максимальному рівні (18 см).

2.2. Встановити люксметр на предметний столик. Для цього слід відкрутити передню гайку і відвести в сторону столик для розміщення дослідних зразків. Встановити чутливий елемент люксметра між двома гвинтами і закріпити гумовим затискачем.

2.3. З дисплею люксметра записати показ рівня освітленості поверхні чутливого елемента за його максимальної відстані до освітлювача.

2.4. Провести аналогічні вимірювання освітленості, знижуючи кожного разу освітлювач на 2 поділки по штативу до мінімального рівня (4 см).

2.5. Після завершення калібрування освітлювача предметний столик повернути у вихідний стан.

13.Провести вимірювання електричних характеристик сенсора освітленості резистивного типу.

- 3.1. За допомогою пінцету встановити зразок сенсора освітленості на предметний столик і закрити його темновим екраном.
- 3.2. Розмістити зонди на магнітах на верхні контактні майданчики сенсора.
- 3.3. Під'єднати зонди до вимірювального обладнання наступним чином: зонд із зеленим маркуванням розмістити в роз'єм "+" на джерелі постійного струму Б5-47, а зонд із синім маркуванням розмістити в роз'єм "ВХІД" на мультиметрі цифровому В7-35, вільним провідником з'єднати джерело постійного струму та мультиметр між собою.
- 3.4. Провести вимірювання струму, що протікає крізь сенсор, в діапазоні напруг від 0,5 до 6,5 В з кроком 0,5 В.
- 3.5. Змінити полярність прикладеної напруги шляхом зміни провідників місцями на джерелі постійного струму Б5-47.
- 3.6. Провести вимірювання струму, що протікає крізь сенсор, в діапазоні напруг від 0,5 до 6,5 В з кроком 0,5 В.
14. Провести вимірювання фоточутливої характеристики (люкс-амперної характеристики (ЛАХ)) сенсора освітленості резистивного типу.
 - 4.1. Зняти із зразку сенсора освітленості темновий екран.
 - 4.2. Ввімкнути освітлювач та виставити його на максимально високому рівні за допомогою рухомої ручки на штативі (18 см).
 - 4.3. Виставити на джерелі постійного струму Б5-47 зворотню напругу 6,5 В.
 - 4.4. Виміряти за допомогою мультиметра цифрового В7-35 світловий струм сенсора.
 - 4.5. Провести аналогічні вимірювання світлового струму сенсора, знижуючи кожного разу освітлювач на 2 поділки по штативу до мінімального рівня (4 см).
15. Провести вимірювання електричних характеристик сенсора освітленості діодного типу.

- 5.1. За допомогою пінцету встановити зразок сенсора освітленості на предметний столик і закрити його темновим екраном.
- 5.2. Розмістити зонд із зеленим маркуванням на верхній контактний майданчик сенсора (лівий або правий), а синій зонд для даного типу вимірювань не задіяний. Натомість для вимірювання ВАХ фотодіоду слід використати провідник з червоним маркуванням, що являє собою нижній контакт р-п-переходу.
- 5.3. Під'єднати зонди до вимірювального обладнання наступним чином: зонд із зеленим маркуванням розмістити в роз'єм "+" на джерелі постійного струму Б5-47, а зонд із червоним маркуванням розмістити в роз'єм "ВХІД" на мультиметрі цифровому В7-35, вільним провідником з'єднати джерело постійного струму та мультиметр між собою.
- 5.4. Провести вимірювання струму, що протікає крізь сенсор, в діапазоні напруг від 0,5 до 6,5 В з кроком 0,5 В.
- 5.5. Змінити полярність прикладеної напруги шляхом зміни провідників місцями на джерелі постійного струму Б5-47.
- 5.6. Провести вимірювання струму, що протікає крізь сенсор, в діапазоні напруг від 0,5 до 6,5 В з кроком 0,5 В.
16. Провести вимірювання фоточутливої характеристики (люкс-амперної характеристики (ЛАХ)) сенсора освітленості діодного типу.
 - 4.1. Зняти із зразку сенсора освітленості темновий екран.
 - 4.2. Ввімкнути освітлювач та виставити його на максимально високому рівні за допомогою рухомої ручки на штативі (18 см).
 - 4.3. Виставити на джерелі постійного струму Б5-47 зворотню напругу 6,5 В.
 - 4.4. Виміряти за допомогою мультиметра цифрового В7-35 світловий струм сенсора.

4.5.Провести аналогічні вимірювання світлового струму сенсора, знижуючи кожного разу освітлювач на 2 поділки по штативу до мінімального рівня (4 см).

7. Вимкнути вимірювальне обладнання.

Обробка результатів роботи

1. Скласти таблицю для калібрування освітлювача, за якою можна встановити рівень освітленості поверхні в залежності від місцезнаходження освітлювача.
2. Побудувати ВАХ сенсорів освітленості резистивного та діодного типу. Розрахувати їх коефіцієнти випрямлення за напруги 6,5 В як відношення прямого струму до зворотнього. У висновку порівняти ВАХ обох сенсорів.
3. Скласти таблиці для калібрування сенсорів освітленості резистивного та діодного типу
4. Побудувати ЛАХ сенсорів освітленості резистивного та діодного типу. У висновку порівняти два типи сенсорів за чутливістю.

Контрольні запитання

1. Що собою являє датчик освітленості? Яка його структура?
2. В чому полягає принцип дії сутінкового вимикача? Наведіть приклади.
3. Перелічіть області використання датчика освітленості. Які переваги забезпечує застосування даного типу датчика?
4. Вкажіть на додаткові датчики, які можуть використовуватись у складі сутінкових вимикачів. Яким чином вони розширюють базові функції цих приладів?

5. В чому полягає явище внутрішнього фотоефекту? Яким чином дане явище проявляється у фотоприймачах?
6. Які види фотоприймачів використовуються в датчиках освітленості? Порівняйте їх між собою за основними характеристиками.
7. Назвіть принцип дії фоторезисторів та перелічіть їх основні параметри і характеристики.
8. Назвіть принцип дії фотодіодів та перелічіть їх основні параметри і характеристики.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

Сенсор ультрафіолетового випромінювання

Мета роботи – ознайомитись на практиці з явищем конверсії електромагнітного випромінювання в пористому кремнії та отримати практичні навички роботи з сенсорами ультрафіолетового випромінювання в фотодіодному та фотогенераторному режимах.

Короткі теоретичні відомості

В даний час найбільш істотним механізмом, що обмежує ефективність сонячних елементів є спектральна невідповідність між падаючим сонячним спектром та шириною забороненої зони напівпровідника. Так, коли енергія падаючих фотонів є меншою, аніж ширина забороненої зони, такі фотони не поглинаються матеріалом і є втраченими з точки зору перетворення сонячної енергії. З іншого боку, фотони, енергія яких значно перевищує ширину забороненої зони матеріалу, поглинаються, однак має місце термалізація фотоелектронів, тобто такі електрони передають надлишок своєї енергії фононам. Два цих механізми відповідальні за втрату майже 50 % сонячної енергії.

Усунути ці втрати можна кількома способами. Для цього можна використовувати кілька гетеропереходів з різною шириною забороненої зони, що максимально перекривають сонячний спектр (так звані «тандемні» сонячні елементи) або використати спектральні конвертори електромагнітного випромінювання. Основна ідея спектральної конверсії полягає в перетворенні спектра падаючого випромінювання, який не узгоджується із шириною

забороненої зони матеріалу сонячного елемента. Існує 3 типи спектрального перетворення: даун-конверсія, даун-шифтинг та ап-конверсія (рис.8).

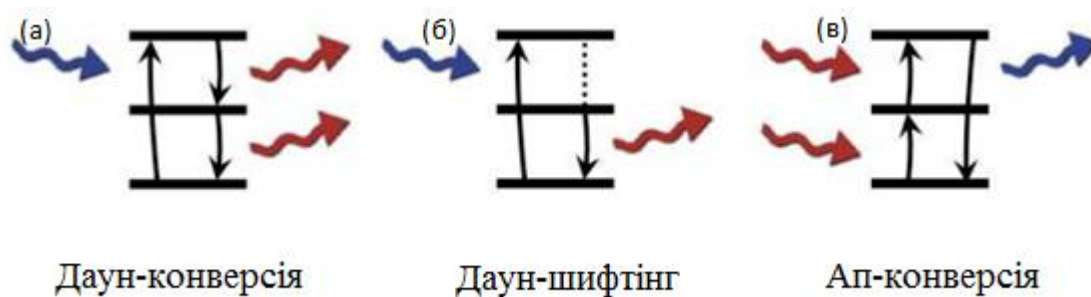


Рисунок 8 – Енергетичні діаграми, що показують перетворення енергії фотонів через механізми: а) даун-конверсії, б) даун-шифтингу та в) ап-конверсії

Даун-конверсія являє собою оптичний процес, в якому один високоенергетичний фотон перетворюється на два фотони з меншою енергією, як показано на рис.8. Фотони з нижчою енергією більш ефективно поглинаються кремнієвим матеріалом через зниження термалізаційних та поверхневих рекомбінаційних втрат. Теоретично для даун-конверсійного перетворювача з шириною забороненої зони 2,2 еВ, що розташований на передній поверхні сонячного елемента з шириною забороненої зони 1,1 еВ, максимальна ефективність буде становити 38,6%.

Даун-шифтинг – це оптичний процес, в якому один високоенергетичний фотон перетворюється на фотон з більш низькою енергією, як показано на рис.8. В даному випадку, ефект полягає у «зсуві» фотонів з високою енергією в область більш ефективної спектральної чутливості сонячного елемента, оскільки спектральна чутливість кремнію в червоному діапазоні спектру вище, ніж в синьому. Теоретично розрахована ефективність кремнієвого ФЕП при використанні даун-шифтингу становить 30%.

Ап-конверсія – це оптичний процес перетворення фотонів з енергією, меншою шириною забороненої зони матеріалу, у більш високоенергетичні фотони,

які можуть бути використані сонячним елементом, як показано на рис.8. Ефективність кремнієвих сонячних елементів може збільшитися до 47% в поєднанні з конвертором цього виду. Оскільки ап-конверсійні шари поглинають фотони, які не адсорбуються сонячним елементом, ці шари розташовують на тильній поверхні сонячних елементів, і їх наявність не може знизити початкову ефективність сонячного елемента.

На рис.9 показано спектральний розподіл падаючого сонячного випромінювання і використання його у ФЕП. Зелена частина відображає частку поглинутої частини сонячного спектра кремнієвим матеріалом фотоелектричного перетворювача. Червона частина спектру відображає додаткове перетворення енергії, якщо кожен фотон з енергією вище, ніж $2E_g$ перетворюється у два фотони близького ІЧ спектру (за механізмом даун-конверсії). Помаранчева частина спектру додаткове перетворення енергії, якщо кожна пара фотонів з енергією між $0.5E_g$ і E_g , перетворюється в один фотон близького ІЧ спектру (за механізмом ап-конверсії).

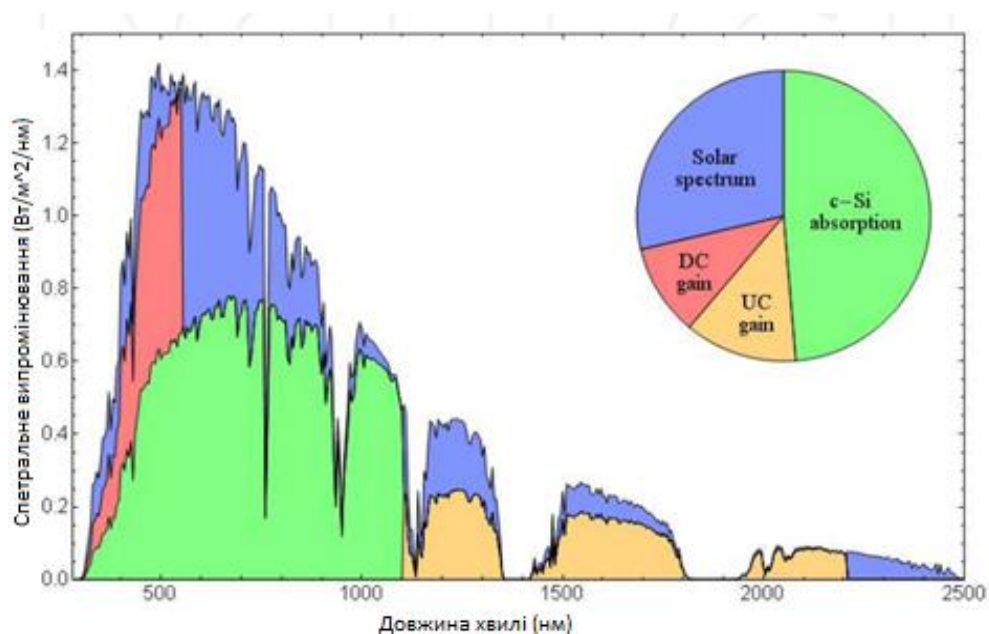


Рисунок 9 – Спектральний розподіл падаючого сонячного випромінювання

Поруватий кремній представляє собою кремнієвий матеріал, що містить пори, розмір яких може коливатись від 1 до 100 нм. Особливістю даного морфологічного різновиду кремнію є можливість випромінювати видиме світло під дією зовнішнього освітлення (фотолюмінесценція) або зовнішнього електричного поля (електролюмінесценція). Колір випромінювання визначається розміром пор і може змінюватись від червоного до синього.

Фотодіоди можуть працювати в одному з двох режимів – з зовнішнім джерелом живлення (фотодіодний режим) та без зовнішнього джерела живлення (фотогенераторний режим). В фотодіодному режимі до фотодіоду прикладається зворотня напруга джерела живлення, відповідно до чого робочою характеристикою є зворотня гілка ВАХ діоду. Фотодіоди, що працюють в фотогенераторному режимі, називаються сонячними елементами, оскільки здатні перетворювати енергію Сонця в електричну енергію. В фотогенераторному режимі під дією світла генерується фотоЕРС, залежність якої від параметрів світлового потоку є робочою характеристикою фотодіода у цьому режимі.

Опис лабораторного стенду

До складу лабораторного стенду входять наступні блоки: вимірювальний прилад (вольтметр цифровий універсальний В7-16А), блок живлення постійного струму, електрооптичний модуль (рис.10) та контролер для його керування (рис. 12).

Будова електрооптичного модуля наведена на рис.10. Такий модуль містить дві матриці фотоприймачів, матрицю світлодіодів з довжиною хвилі випромінювання 356 нм та 2 пластини поруватого кремнію з люмінесцентними властивостями. Контролер керування призначений для подачі сигналів на матриці світлодіодів та фотоприймачів (рис.12).



Рисунок 10 – Будова електрооптичного модуля

А. Оптична схема стенду (рис.11). Світло LEDs матриці (1, блакитна стрілка) падає на пластини поруватого кремнію (2), поглинається ним та частково відбивається (В). Завдяки люмінесценції поруватого кремнію, він починає випромінювати світло у видимому діапазоні (червона стрілка). Це світло попадає до матриць фотоприймачів (3) через оптичні фільтри (4), які не пропускають відбите поруватим кремнієм ультрафіолетове випромінювання (В) LEDs до фотодіодів.

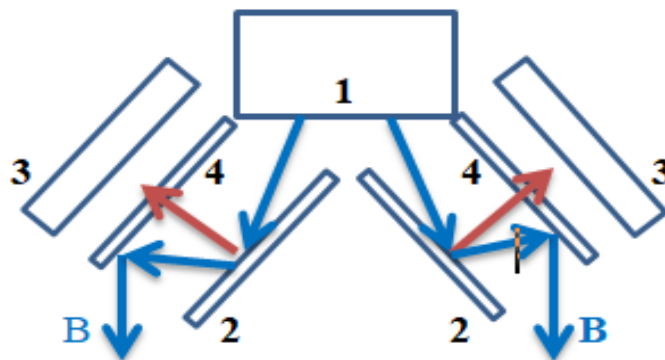


Рисунок 11 – Оптична схема стенду



а)



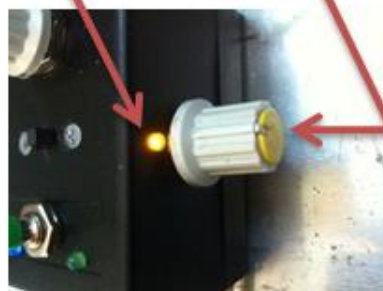
б)

Індикатор та регулятор струму LEDs матриці для діапазону «І» :



в)

Індикатор та регулятор струму LEDs матриці для діапазону «ІІ» :



г)



д)

Рисунок 12 – Зображення контролера керування (а) та окремих органів його керування (б, в, г, д)

Таким чином, падаюче на поруватий кремній ультрафіолетове випромінювання конвертується в видиме випромінювання червоного кольору і реєструється кремнієвими фотоприймачами.

Б. Електрична схема стану (рис.13 та 14).

1. Блок живлення забезпечує стабільний струм для матриці LEDs та напруги для компонентів схеми контролера.

2. Матриці фотоприймачів (2 шт), які складаються з шести з'єднаних паралельно фотодіодів BPW-34 кожна, перетворюють світло від поруватого кремнію на електричний струм.

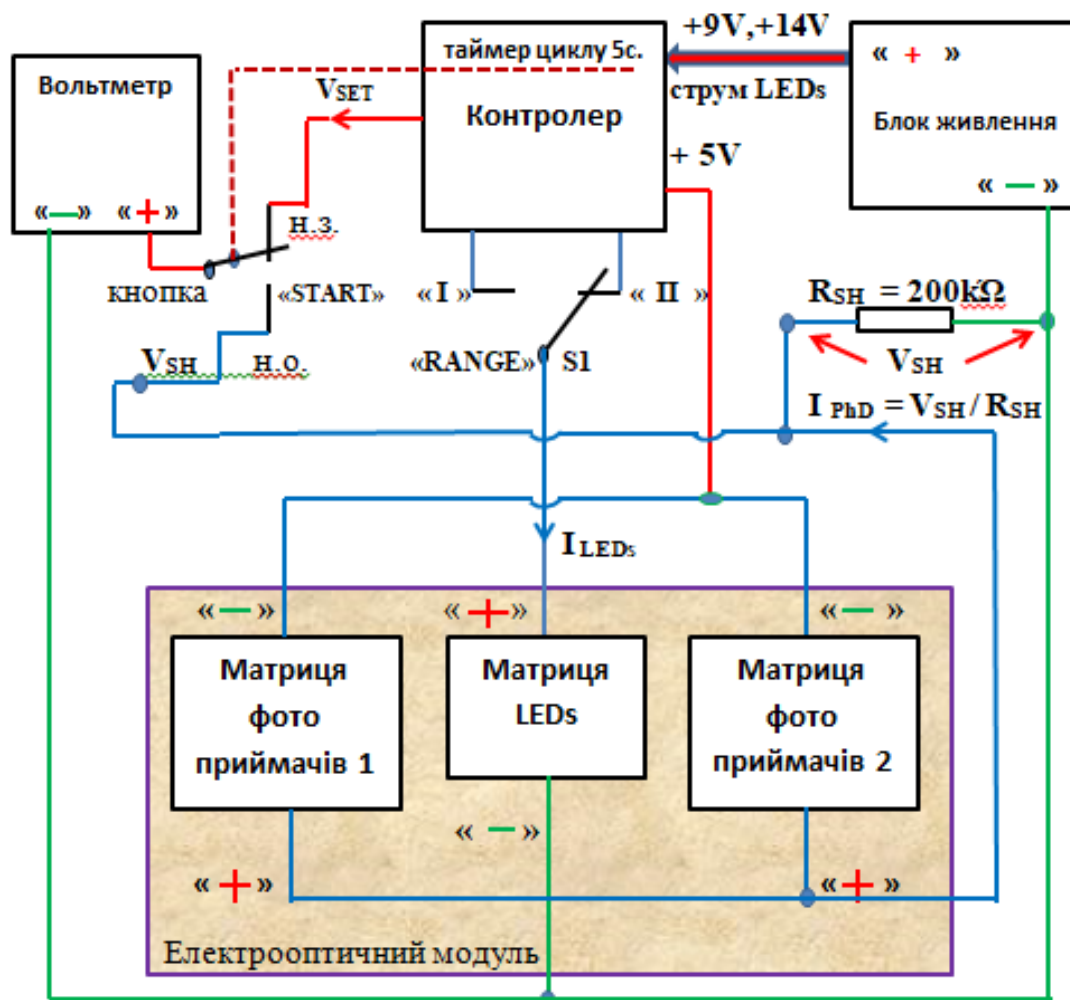


Рисунок 13 – Спрощена електрична схема стану в режимі «Photodiode» при відтиснутому перемикачі S2 «MODE»

3. Контролер керує струмом матриці LEDs у діапазонах сили струму « I » та « II », відповідно до табл.1. Контролер має джерело стабілізованої напруги 5 V для зворотного зміщення фотоприймачів електрооптичного модуля при роботі в фотодіодному включенні та джерело напруги V_{SET} для встановлення положень регуляторів струму матриці LEDs у вибрані користувачем в режимі «SET» значення струму .

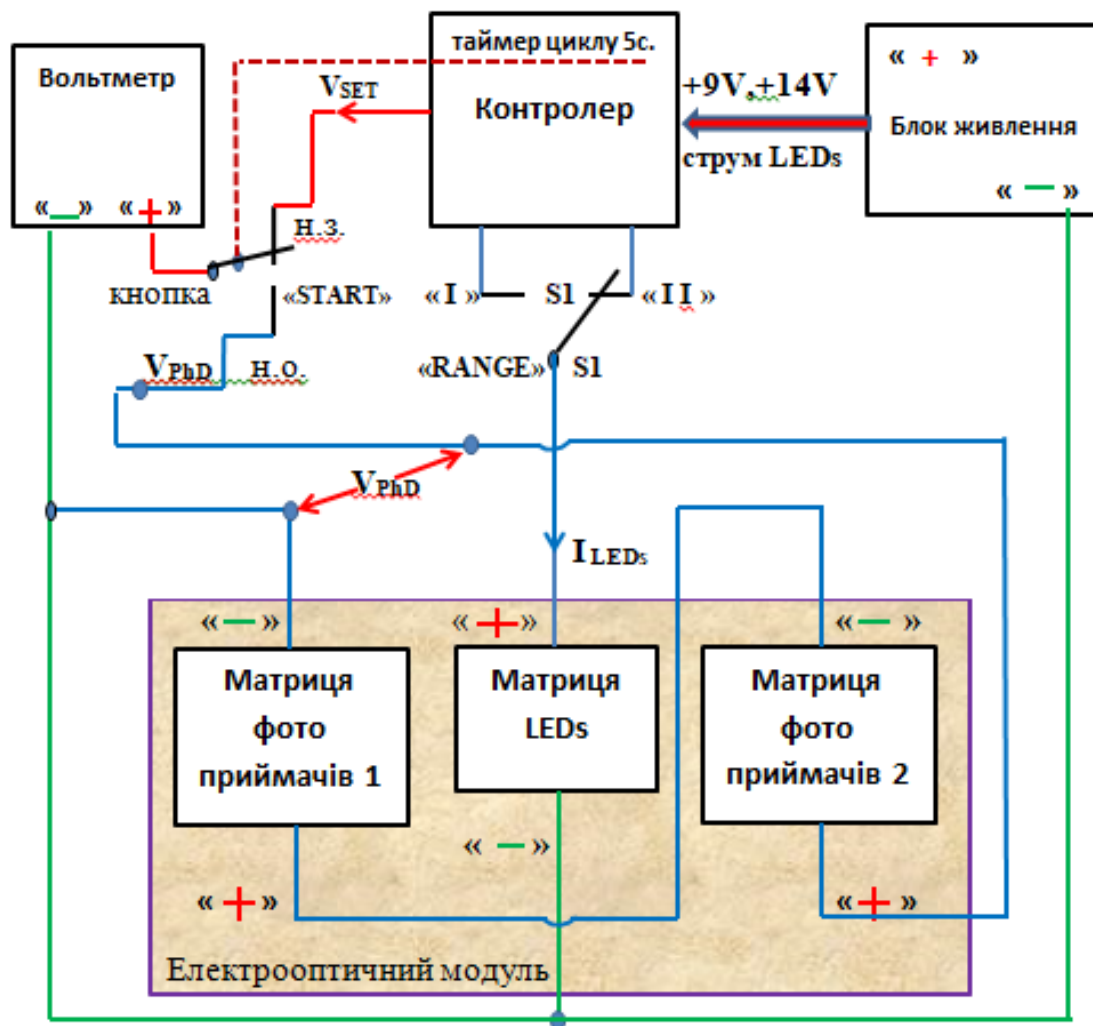


Рисунок 14 – Спрощена електрична схема стенду в режимі «Photovoltaic» при натиснутому перемикачі S2 «MODE»

5. Вольтметр вимірює: 1) відповідно до значень табл.1, величину напруги з контролера $V_{SET} = f(I_{LEDs})$ при роботі в режимі «SET» через нормально замкнуті контакти кнопки «START»; 2) напругу V_{SH} на опорі $R_{SH}=200k\Omega$ через

нормально розімкнуті контакти, яка визначає фотострум діодів матриць за формулою:

$$I_{PhD} = V_{SH}/R_{SH} \quad (20)$$

Таблиця 2 – Співвідношення сили струму через матрицю LEDs в режимі «CYCLE» у величину напруги V_{SET} , за показаннями вольтметра в режимі «SET»

V_{SET}, V	I_{LEDs}, mA
I діапазон «100»	
5,75	8,5
5,35	9,3
4,95	10,6
4,55	13,4
4,15	15
3,75	16,6
3,35	18,6
2,95	21,1
2,55	24,3
2,15	28,8
1,75	35,4
1,35	45,6
0,95	64,2
II діапазон «10»	
0,8	540
1,0	480
1,4	390
1,8	280
2,2	250
2,6	218
3,0	192
3,4	171
3,8	154
4,2	141
4,6	129
5,0	119
5,4	188

Порядок виконання роботи

1. Отримати вказівку від викладача про вибір схеми з'єднання матриць фотоприймачів за допомогою перемикача S2. При цьому засвітиться відповідний індикатор на передній панелі контролера.

2. Підключити стенд до мережі 220 V за допомогою вимикача.

3. Відповідно до таблиці табл.2 встановити значення струму матриці LEDs за допомогою S1 та відповідного регулятора струму за показаннями вольтметра. При цій операції світиться індикатор «SET» червоного кольору та світяться індикатори червоного або жовтого кольору, відповідно до вибраного діапазону струму. Колір світіння індикаторів співпадає з кольором вставки у верхній частині регуляторів струму.

4. Записати показання вольтметра.

5. Провести вимірювання V_{SH} або V_{PHD} . Для цього слід натиснути (на одну секунду) кнопку «START» контролера та записати показання вольтметра. При цій операції гасне індикатор «SET» та блимає індикатор «CYCLE» зеленого кольору на верхній панелі контролера. По завершенню циклу вимірювання індикатор «CYCLE» гасне та знову засвічується індикатор «SET».

6. Записати показання вольтметра.

7. Провести послідовно операції за п.3 – п.5 для всіх значень струму з табл.2.

8. Після завершення вимірювань, вимкнути стенд за допомогою вимикача.

Обробка результатів

1. Розділити значення напруг V_{SH} , виміряні в фотодіодному режимі, на величину шунта (200 кОм), що забезпечить масив даних по величині зворотного струму фотодіоду.
2. Побудувати графічну залежність величини фотоструму фотодіоду від величини струму через світлодіод.

3. Побудувати графічну залежність величини фотоЕРС від величини струму через світлодіод.
4. Зробити висновок про вплив величини падаючого УФ випромінювання на зворотній фотострум та фотоЕРС сенсора, а також про чутливість сенсора в різних робочих режимах.

Контрольні запитання

1. В чому полягає ідея спектральної конверсії електромагнітного випромінювання? Які види енергетичних втрат в напівпровідниковому матеріалі вона дає змогу усунути?
2. Що собою являє процес даун-конверсії? В якій частині структури сонячного елемента розташовується такий конвертор?
3. Що собою являє процес даун-шифтингу? В якій частині структури сонячного елемента розташовується такий конвертор?
4. Що собою являє процес ап-конверсії? В якій частині структури сонячного елемента розташовується такий конвертор?
5. Назвіть режими роботи фотодіода та вкажіть на принципові відмінності між ними.
6. Що собою являє пористий кремній? Вкажіть на головну відмінність пористого кремнію від монокристалічного аналогу?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: В 3-ох т./ В. Вуйцік, З. Готра, О. Готра та інш.; Львів: Ліга-Прес, 2003. – 595 с.
2. Эггинс Б. Химические и биологические сенсоры. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.
3. Фрайден Дж. Современные датчики. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
4. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
5. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: підручник / Є.С. Поліщук [та ін.] Львів: Вид-во "Бескид Біт", 2008. – 618 с.
6. Датчики. Устройство и применение / Г. Виглеб. М.: Мир, 1989. – 196с.
7. Датчики измерительных систем: В 2-х кн. / Ж. Аш и др. М.: Мир, 1992. – 480 с.
4. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир. – 1988. – 416 с.
5. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / под ред. Р. Дж. Киеса. М.: Радио и связь. – 1985. – 328 с.
6. Пасынков В.В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. – СПб: Лань, 2002. – 480 с.
7. В.П. Михеев, А.В. Просаедеев Датчики и детекторы. – М.: МИФИ, 2007. – 172 с.
8. Борисов, О. В. Мікроелектронні сенсори на основі кремнієвих р-п-переходів: навч. посіб. / О.В. Борисов, П.О. Яганов. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 151 с.
9. Белих, І.А. Біологічні та хімічні сенсорні системи: навч. посіб. / І.А. Белих, М.Ф. Клещев. – Харків: НТУ "ХПІ", 2011. – 144 с.

10. Косяченко, Л. А. Основи інтегральної та волоконної оптики / Л.А. Косяченко. – Чернівці: Рута, 2008. – 348 с.
11. Осадчук, В. С. Сенсори газу / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, М.О. Прокопова; Вінницький нац. техн. ун-т. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2008. – 167 с.
12. Таланчук, П. М. Теорія напівпровідникових сенсорів газу: фундаментальні основи, аналіз, синтез. / П.М. Таланчук, О.С. Мороз. – Київ: Університет "Україна", 2008. – 256 с.
13. Войтович, І. Д. Інтелектуальні сенсори / І. Д. Войтович, В. М. Корсунський; НАН України, Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова. – К., 2007. – 514 с.
14. Осадчук, В. С. Сенсори вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик; Вінниц. держ. техн. ун-т. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2003. – 208 с.